

基于CFD方法的楼宇风场模型研究

王卫刚¹, 何春霞²

¹上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海

²上海城建职业学院人工智能应用学院, 上海

收稿日期: 2026年3月8日; 录用日期: 2026年4月1日; 发布日期: 2026年4月8日

摘要

近年来, 随着经济和社会的发展我国城市化进程发展迅猛, 但国内对城市楼宇风灾的研究亟待加强。本文以上海市某区域为例, 采用计算流体力学(CFD)方法对城市楼宇风场进行模拟分析。结果表明, 楼宇周围的绕流风场比较复杂, 楼宇之间存在明显的干扰效应; 相邻楼宇间存在明显的“狭管效应”, 也导致了风速增大。下游楼宇由于受到上游楼宇的“遮挡”, 其尾流区存在明显的风速减弱现象。最后通过现场实测的方式验证了模型的可靠性并进行了优化。

关键词

城市楼宇, 风场, 模型, 计算流体力学, 狭管效应

Research on Urban Building Wind Field Modeling Based on CFD Method

Weigang Wang¹, Chunxia He²

¹Shanghai Municipal Engineering Design and Research Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai

²School of Artificial Intelligence Application, Shanghai Urban Construction Vocational College, Shanghai

Received: March 8, 2026; accepted: April 1, 2026; published: April 8, 2026

Abstract

In recent years, with the development of the economy and society, China's urbanization process has advanced rapidly, but research on wind disasters in urban buildings remains urgently needed. Taking a certain area in Shanghai as an example, this paper employs computational fluid dynamics (CFD) to simulate and analyze urban building wind fields. The results indicate that the flow field around buildings is relatively complex, with significant interference effects between adjacent structures. A notable "funneling effect" occurs between neighboring buildings, also leading to increased wind

speeds. Downstream buildings experience a significant wind speed reduction in their wake due to the “blockage” effect from upstream structures. Finally, the model’s reliability is verified through field measurements, followed by optimization.

Keywords

Urban Buildings, Wind Field, Model, Computational Fluid Dynamics, Funnel Effect

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

目前,我国城市现代化进程正经历着跨越式的发展,大型中心城市在短短数年间便兴建起了发达国家花费几百年才建起的高层建筑与大型公共建筑。但由于城市管理与规划设计部门对建筑的风环境重视不够,在规划设计中没有充分考虑风环境因素,缺乏对建筑风环境的评估,导致一系列负面影响开始显现出来,楼群风灾就是问题之一。

计算流体力学(CFD)具有强大的模拟计算、数据处理和可视化功能,具有节约成本、高效灵活的特点。近年来被更广泛地应用于城市与建筑风环境研究。1999年,Shuzo Murakami等[1]以CFD数值模拟的方式,对多尺度风场环境进行了预测,指出了城市风流动具有复杂性,推动了CFD技术在多尺度风环境研究中的应用。2006年,王辉等[2]以数值模拟的方式,研究了典型排布方式的建筑群的风环境,说明了数值模拟的方法能够用来进行风洞实验前期的预测,作为建筑群布局方案的合理选择以及建筑结构抗风设计的依据。2007年,王珍吾等[3]参照风速区域面积比率和最大速度两个指标,以数值模拟的方法对六幢建筑的四种布局进行了研究。2007年,马剑、程水福[4]用基于Reynolds时均方程和重正化群(RNG)k-e湍流模型的模拟方法,对六栋矩形截面的高层建筑构成的建筑群附近的风场进行了分析,研究中通过对每列建筑的横风向间距做出改变,得到了多种不同布局状态的建筑群,对比了这些建筑群附近人行高度处的风速比和风速矢量场。2008年,史彦丽[5]用数值模拟的方式,分析了当建筑高度及建筑布局存在差异时,建筑外围的风环境的变化规律。2011年,张大昕等[6]基于CFD理论,采用有限体积法模拟了复杂建筑物周边的风场环境,分别对不同风速风向下建筑物周边的风场特征进行了研究,对建筑物周边的风速进行了定量分析,以探究复杂建筑物附近的风场分布及其外形对其周边风场的影响。2012年,乐地等[7]采用计算机数值模拟软件对长沙市中心的典型区域的风场环境进行了研究,研究结果表明如果城市中建筑群的布局方式不当,会造成多个方面的不利影响。2013年,石小倩[8]利用数值模拟方法对综合教学楼的风环境进行了模拟与验证,模拟结果通过与实测数据的对比,对参数进行了调整和优化,采用优化之后的设置对济南市主导风向(南偏西风向)和次主导风向(东偏北风向)下济南市内三种不同类型的小区在不同的情况下进行了风场环境的模拟。2014年,王宇婧[9]使用基于可压缩流方程的数学模型,模拟和评价了北京市内某高层建筑附近的人行高度处的风环境状况。2015年,Chong Peng等[10]以武汉市区的大智门周边区域为例,利用CFD技术进行模拟,在社区层面上分析了不同改造策略对风场和热环境的影响。2015年,Y Toparlar, B. Bloeken等[11]通过CFD模拟,预测了鹿特丹南部地区的城市温度,模拟包括风的流动和热的传导、对流和辐射。结果表明计算流体力学能够以与实验数据平均偏差7.9%的精度预测城市地表温度,说明CFD有准确预测都市小气候的潜力。2025年,李学臻等[12]利用CFD数

值模拟技术, 研究了高层建筑群在多层建筑群上游、中游、下游三种不同的位置下, 对临近的多层建筑群城市风环境的影响, 结果表明: 不同位置的高层建筑群对临近多层建筑群的流场和压力场分布均起到了显著影响。

计算流体动力学方法在单体建筑周边的风环境及建筑群内部风场环境的评估研究中发挥了重要作用。利用计算机数值模拟技术, 学者们对居民居住区、城市中心商业街区等不同城市区域都进行过研究, 并结合人体舒适度、建筑结构强度等不同角度对环境进行了评估。计算流体动力学模拟方法计算结果更加直观、详细, 而且可以获取研究区域内任意位置、任意高度的风场情况, 与实地测试法和风洞实验方法相比有着一定的优势。在城市风环境的研究中, 计算流体动力学模拟方法是一种重要的技术手段, 这种方法也将是城市风场研究在未来的重点之一。

2. 模型构建

2.1. 研究区域

本研究选取上海某区域作为研究对象, 面积约 0.66 平方公里。对研究区域内的地面构筑物进行合理取舍, 在保证基本特征基础上, 尽可能简化, 达到既保证预警精度, 又提高预警效率。基于上述原则, 在进行楼宇风环境 CFD 计算阶段, 根据下述原则对地面构筑物进行简化, 即:

- (1) 仅保留 2 层及其以上楼宇;
- (2) 简化楼宇气动外形, 精度控制在 2.0~4.0 米之间。

基于上述简化原则, 并对示范区域进行实地勘测, 最终保留 64 栋楼宇, 如图 1 所示。



Figure 1. Simplified and retained building models in the demonstration area
图 1. 示范区域内简化后保留的楼宇模型

2.2. 湍流模型

湍流模型选用 Realizable $k-\varepsilon$ 模型[13], 该模型是目前两方程模型中适用范围广, 精度高, 而且比较可靠的湍流模型。其他与 CFD 计算相关的设置包括: 控制方程采用分离式方法(Segregated)求解; 压力和速度的耦合采用 SIMPLEC [14]算法; 控制方程的对流项采用二阶迎风格式。计算收敛准则取残差值为 5×10^{-4} 。

2.3. 计算域和网格优化

CFD 数值模拟计算采用 1/500 缩尺模型。根据经验, 计算域大小取为 $130 H \times 104 H \times 7 H$ (流向 \times 展向 \times 竖向), 其中 H 为区域内最高建筑高度, 实际高度为 85 米。网格剖分方案采用内域和外域相结合的方法; 内域采用 Poly 多面体网格技术, 外域采用结构化网格。楼宇壁面设置边界层网格以捕捉近壁区流动, 其中水平方向近壁面最小网格尺度为 $0.01 H$, 高度方向近壁面最小网格尺度为 $0.012 H$; 各方向网格伸展率均不超过 1.2, 以保证 CFD 数值模拟结果的精度和计算稳定性。经网格无关性验证, 最终确定网格总数约 400 万。计算域内和楼宇附近局部网格如图 2 所示。

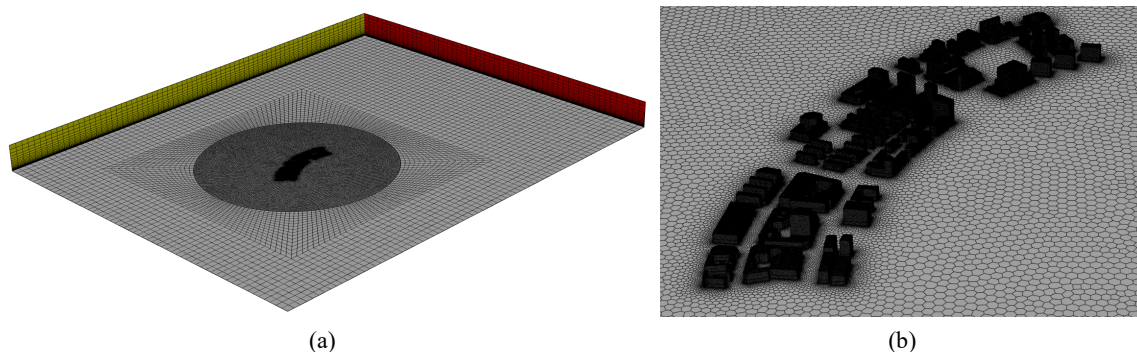


Figure 2. Grid generation (a) Grid within the computational domain, (b) Grid near the buildings

图 2. 网格划分 (a) 计算域内网格, (b) 楼宇附近网格

边界包括入流面、出流面、计算域顶部及两侧面, 以及楼宇表面及地面。各边界条件如下:

(1) 入流面边界条件: 采用速度来流边界条件(Velocity-inlet)。CFD 计算中模拟了我国现行《建筑结构荷载规范》(GB50009-2012) [15]规定的 B 和 C 类风场。为确保数值模拟精度, 采用了风剖面自保持技术。平均风剖面采用对数率表达式[16]:

$$U(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln \left(\frac{z + l_s \cdot z_0}{l_s \cdot z_0} \right) \quad (1)$$

式中, κ 为卡门常数, 取值 0.40; u_* 为摩擦速度, z_0 为地面粗糙高度。各参数如表 1 所示; B 类和 C 类地貌距离地面 10 m 处平均风速取 $U_{10} = 10.6$ m/s。

湍动能和耗散率分别采用下式表达[16]:

$$k(z) = \frac{u_*^2}{\sqrt{C_\mu}} \sqrt{C_1 \cdot \ln \left(\frac{z + l_s \cdot z_0}{l_s \cdot z_0} \right) + C_2} \quad (2)$$

$$\varepsilon(z) = \frac{u_*^3}{\kappa(z + l_s \cdot z_0)} \sqrt{C_1 \cdot \ln \left(\frac{z + l_s \cdot z_0}{l_s \cdot z_0} \right) + C_2} \quad (3)$$

式中, C_μ 为模型常数, 取值 0.04; C_1 和 C_2 为拟合常数, 如表 1 所示。

Table 1. Parameter values for inlet boundary conditions

表 1. 入流边界条件参数取值

地貌类别	摩擦速度 u_* (m/s)	粗糙高度 z_0 (m)	常数 C_1	常数 C_2
B 类	0.8	0.05	-0.075	0.955
C 类	1.2	0.3	-0.053	1.000

- (2) 出流面边界条件: 采用压力出流边界条件(Pressure-outlet);
- (3) 计算域顶部及两侧面边界条件: 采用对称边界条件(Symmetry);
- (4) 结构表面及地面边界条件: 采用无滑移壁面边界条件(Wall)。

数值风场建立过程中, 来流边界条件的模拟至关重要。本研究中 B 类地貌采用标准壁面函数[17], C 类地貌采用自定义壁面函数[18]:

$$\frac{U}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{z}{K_s} + C - \delta B \tag{4}$$

式中, 常数 $C=1.9$; K_s 为物理粗糙高度; δB 为附加项, 取值通过试算确定, 当其值为 0 时即为标准壁面函数。

图 3 为 CFD 数值模拟所得计算域入流面, 以及入流面至模型前方中间位置处的平均风速剖面比较, 图中还给出了《建筑结构荷载规范》(GB50009-2012) [15]规定的 B 类风场和 C 类风场风剖面。由图可见, 采用上述边界条件和 CFD 求解参数设置(其中 C 类地貌自定义壁面函数附加项取 $\delta B = 6.5$), 能够较好地实现平均风速剖面的自保持, 从而确保了楼宇基本风场数值模拟结果的精度。

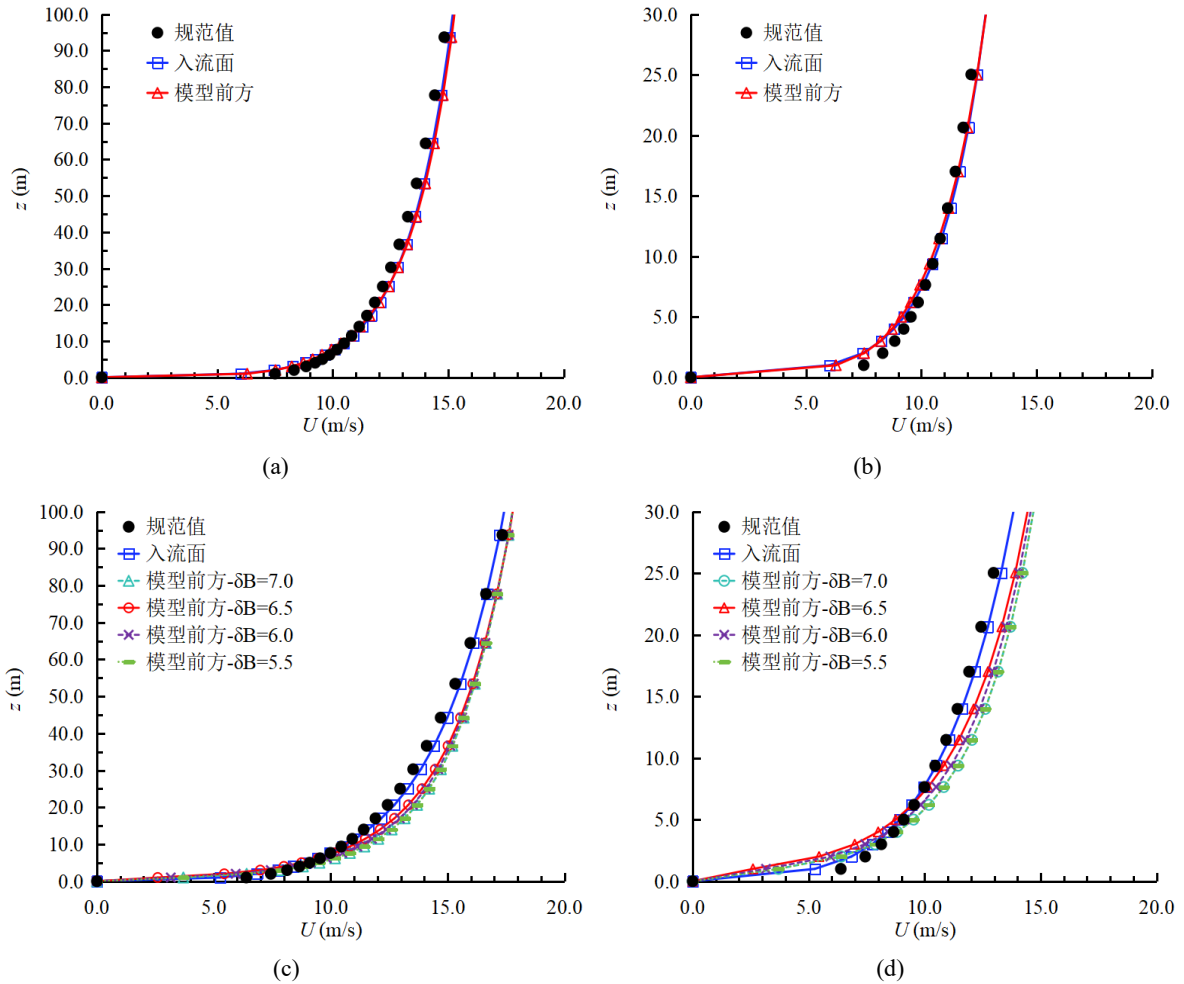


Figure 3. Numerical simulation results of wind field (a) Type B geomorphology; (b) Near-ground Type B geomorphology; (c) Type C geomorphology; (d) Near-ground Type C geomorphology

图 3. 风场数值模拟结果(a) B 类地貌; (b) B 类地貌近地面; (c) C 类地貌; (d) C 类地貌近地面

2.3. CFD 工况

CFD 数值模拟计算中风向和风场类型如图 4 所示, 风向间隔 45°, 共计 8 个标准风向。

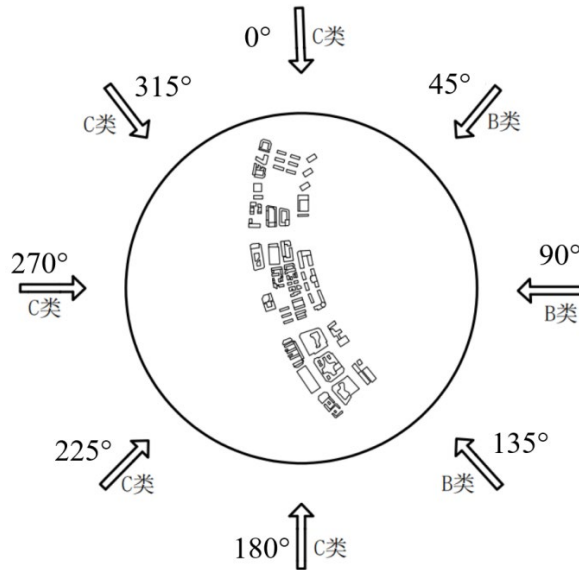


Figure 4. Schematic diagram of wind direction and wind field type
图 4. 风向和风场类型示意图

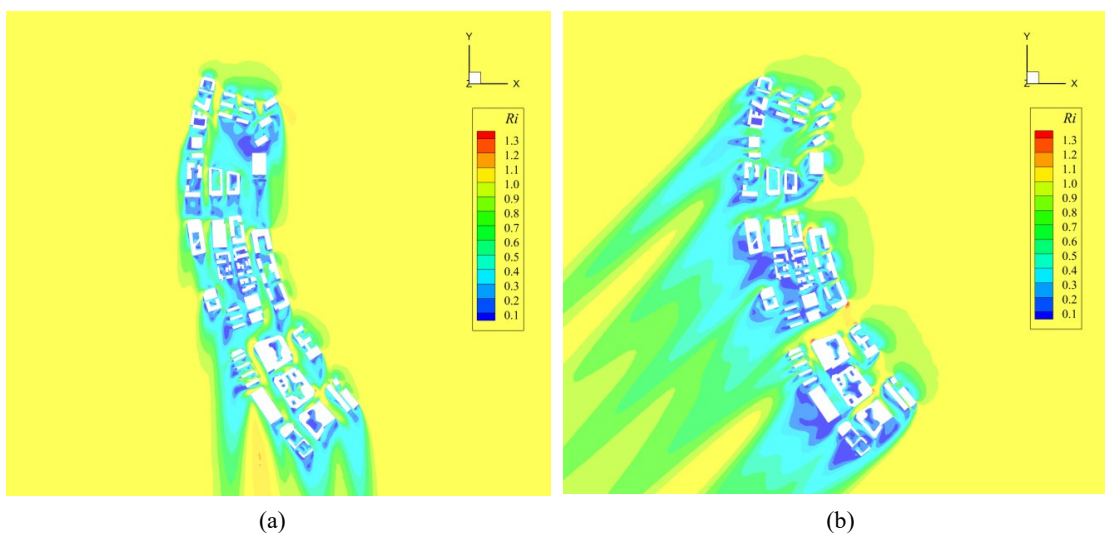
3. 数值模拟结果分析

采用以 10 米高度处来流平均风速无量纲化的风速比 R_i 分析楼宇周围的风环境, 其表达式为:

$$R_i = \frac{U_{i,CFD}}{U_{10}} \quad (5)$$

式中, $U_{i,CFD}$ 为 CFD 数值模拟所得楼宇绕流风场中测点 i 的风速值。

图 5 分别给出了距离地面 10 米高度处水平截面的风速比 R_i 云图, 图中风速比 $R_i > 1.0$ 表明该位置存在风加速现象, $R_i < 1.0$ 则表明该位置存在风速减弱现象。



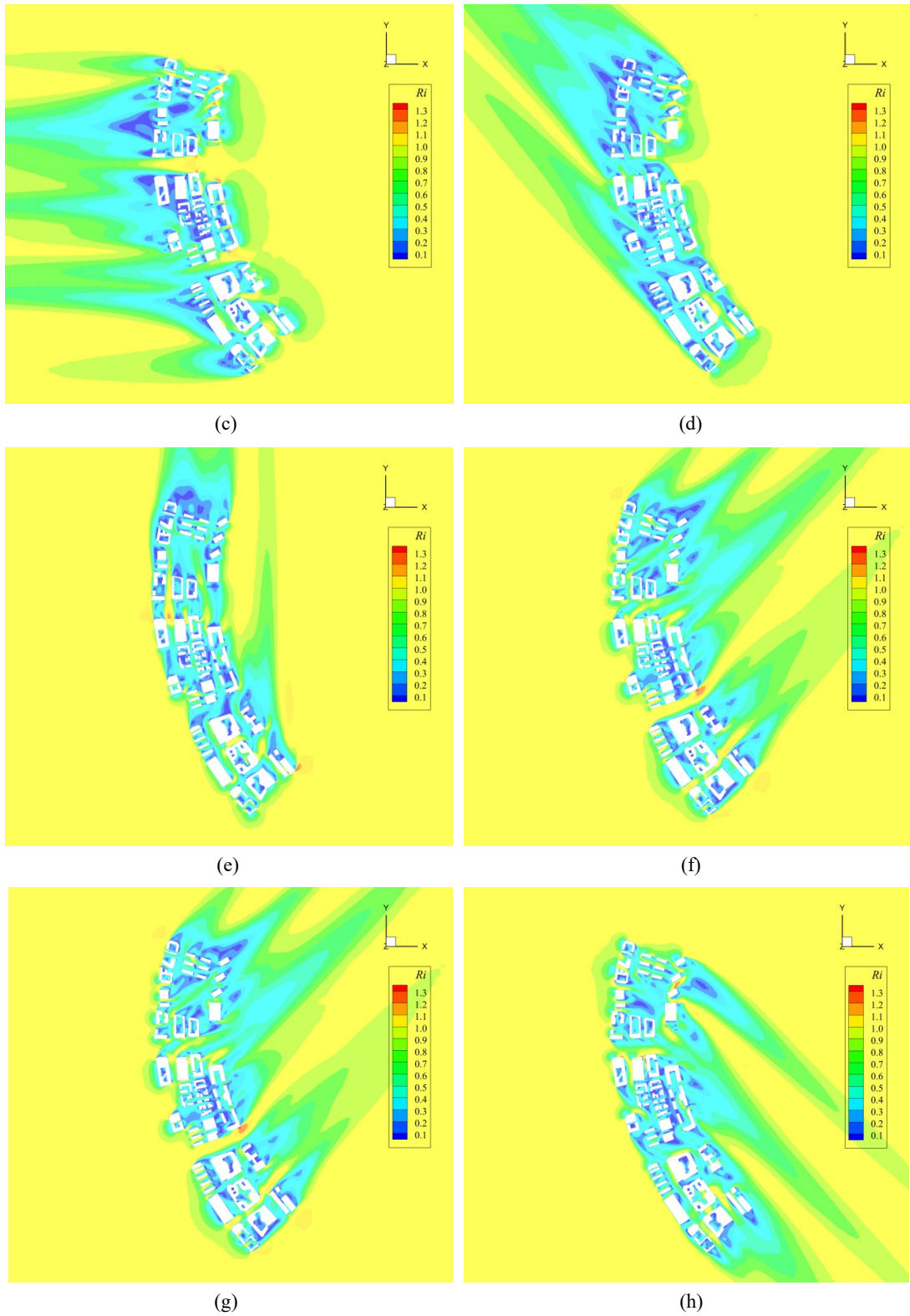


Figure 5. Cloud diagram of wind speed ratio in different wind directions at a height of $Z = 10$ m (a) 0° ; (b) 45° ; (c) 90° ; (d) 135° ; (e) 180° ; (f) 225° ; (g) 270° ; (h) 315°

图 5. 在 $Z = 10$ m 高度时不同风向的风速比云图(a) 0° ; (b) 45° ; (c) 90° ; (d) 135° ; (e) 180° ; (f) 225° ; (g) 270° ; (h) 315°

由图 5 可见, 楼宇的角部位置、距离相对较近的相邻楼宇间等多个区域存在明显的风加速现象, 局部区域最大风速比 R_i 可达 1.3; 楼宇的下游背风面区域风速明显减弱, 多数区域风速比 R_i 小于 0.5。

楼宇周围的绕流风场比较复杂, 楼宇之间存在明显的干扰效应; 对于上游楼宇来说, 由于不受楼宇“遮挡”, 其角部区域存在明显的流动分离而产生风加速现象; 此外, 相邻楼宇间存在明显的“狭管效应”, 也导致了风加速; 而对于下游楼宇来说, 由于受到上游楼宇的“遮挡”, 其尾流区存在明显的风速减弱现象。

4. 模型验证与优化

通过现场实测的方式验证模型的可靠性, 并进行优化。首先制定验证方案, 验证方案的关键点在于根据现场风速和风向, 选择两个观测位置进行同步观测, 以验证风速比的计算结果是否合理。观测设备为 2 套上海气象仪器厂有限公司生产的 PAMS-I(E) 便携式自动气象站。PAMS-I(E) 便携式自动气象站可以对环境的气象要素进行全自动观测, 能实时测量温度、湿度、风向、风速、气压; 实时存储测量数据; 带有显示屏可以现场读数; 也可以通过有线(RS232)方式通讯将测量、存储的数据输出到计算机形成文本文件; 或者通过无线(WIFI)方式与平板连接并实时显示测量数据; 可手持、车载或固定安装使用。该设备有多种平均风速和风向输出方式, 本研究采用 10 分钟平均: 采用滑动平均方法, 每分钟给出 2 个 10 分钟平均风速。根据天气预报, 选择 2024 年 3 月 17 日进行现场实测。由于主导风向为东北风, 观测高度为 5 米, 观测时间为上午 11:00~12:00 点约 1 个小时, 采集 120 个 10 分钟平均风速样本点。

图 6 和图 7 给出干扰位置和迎风位置的风速和风向。由图可见: 迎风位置的风速在 4~10 米/秒之间。根据天气预报, 当日浦东风速在 4 级左右, 对应的平均风速为 5.5~7.9 米/秒, 阵风风速为 8.0~10.7 米/秒, 两者比较接近。迎风位置的风向在 0° ~ 75° 之间, 和天气预报的东北风基本接近。

图 8 给出干扰位置的风速比时程(干扰位置风速除以迎风位置风速), 由图可见, 风速比的变化范围在 0.95~1.15 之间, 平均值为 1.05。考虑到道路交通对风速的干扰, 以及由于条件所限, 此处测风高度为 5 米, 总体而言, 本研究利用 CFD 技术给出的风环境模型可以可靠反映由于建筑群引起的风速干扰效应。

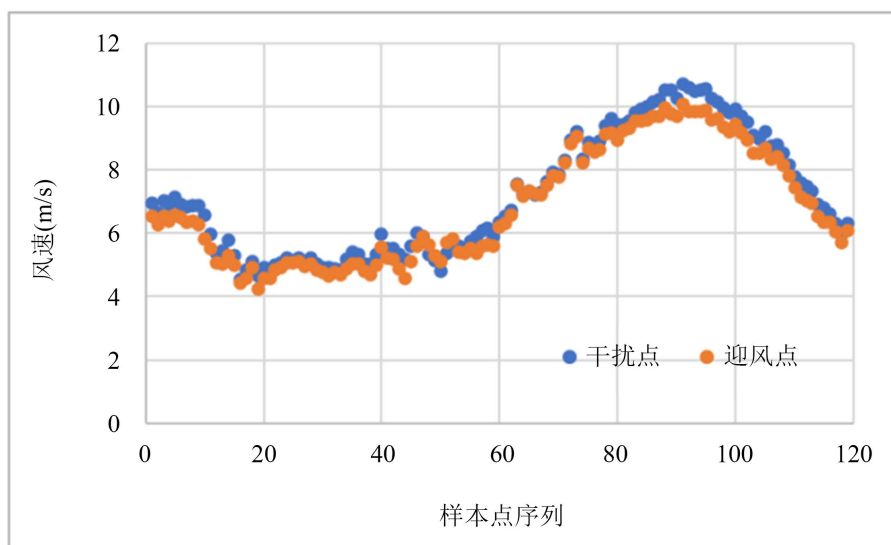


Figure 6. Wind speed time history of interference position and windward position (10 minute moving average)

图 6. 干扰位置和迎风位置风速时程(10 分钟滑动平均)

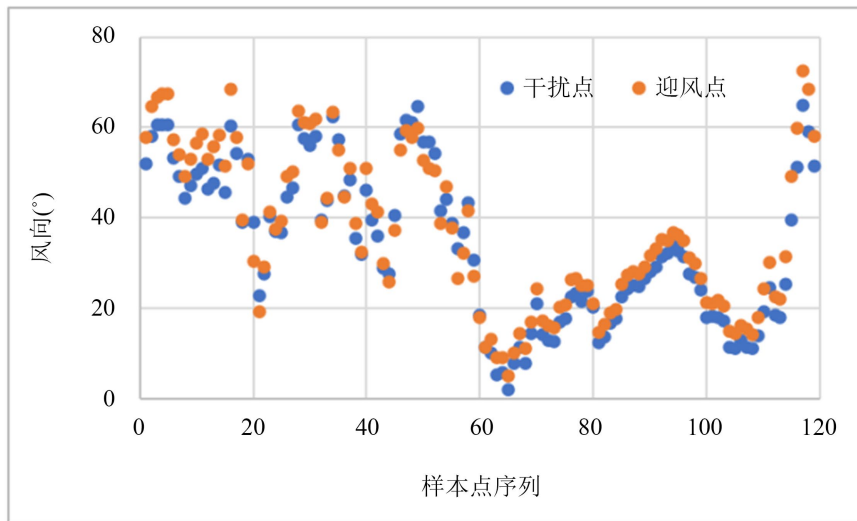


Figure 7. Interference position and windward position wind direction time history (10 minute moving average)

图 7. 干扰位置和迎风位置风向时程(10 分钟滑动平均)

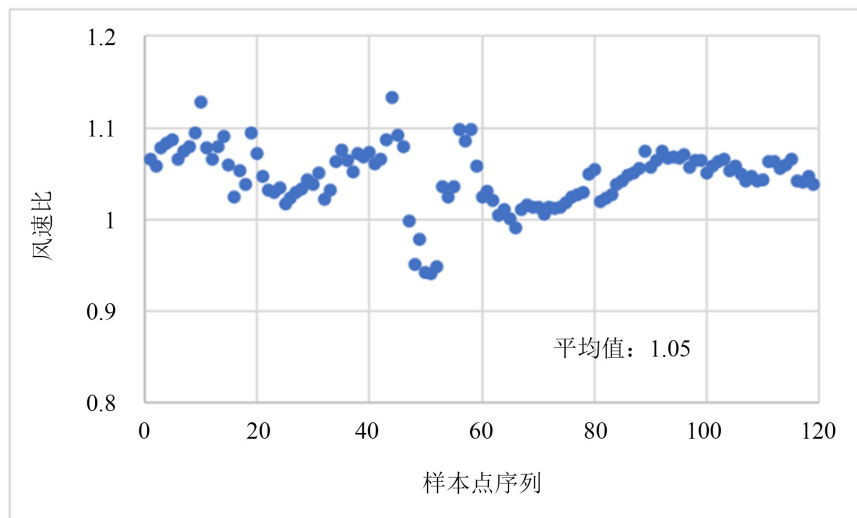


Figure 8. On site measured location

图 8. 现场实测位置

5. 结论

本文提出了城市楼宇风场的 CFD 模拟计算方法, 选择 Realizable $k-\epsilon$ 湍流模型以及 1/500 缩尺模型, 对研究区域进行模拟分析, 并与实际监测值对比, 得出以下结论:

- (1) 本研究利用 CFD 技术给出的城市楼宇风场模型可以可靠反映由于建筑群引起的风速干扰效应。
- (2) 城市楼宇周围的绕流风场比较复杂, 楼宇之间存在明显的干扰效应; 相邻楼宇间存在明显的“狭管效应”。

参考文献

- [1] Murakami, S., Ooka, R., Mochida, A., Yoshida, S. and Sangjin Kim, (1999) CFD Analysis of Wind Climate from Human

- Scale to Urban Scale. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, **81**, 57-81. [https://doi.org/10.1016/s0167-6105\(99\)00009-4](https://doi.org/10.1016/s0167-6105(99)00009-4)
- [2] 王辉, 陈水福, 唐锦春. 群体建筑风环境的数值模拟及分析[J]. 力学与实践, 2006, 28(1): 14-18.
- [3] 王珍吾, 高云飞, 孟庆林, 等. 建筑群布局与自然通风关系的研究[J]. 建筑科学, 2007, 23(6): 24-27, 75.
- [4] 马剑, 陈水福. 平面布局对高层建筑群风环境影响的数值研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2007, 41(9): 1477-1481.
- [5] 史彦丽. 建筑室内外风环境的数值方法研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 湖南大学, 2008.
- [6] 张大昕, 石玲, 张殿新, 等. 复杂建筑物风环境数值模拟分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2011, 27(4): 731-736.
- [7] 乐地, 李念平, 苏林, 等. 基于道路布局的城市区域热环境数值模拟研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2012, 39(1): 27-31.
- [8] 石小倩. 城市小区风场对建筑物空间格局的响应[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东师范大学, 2013.
- [9] 王宇婧. 北京城市人行高度风环境 CFD 模拟的适用条件研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 清华大学, 2012.
- [10] Peng, C., Ming, T., Cheng, J., Wu, Y. and Peng, Z. (2015) Modeling Thermal Comfort and Optimizing Local Renewal Strategies—A Case Study of Dazhimen Neighborhood in Wuhan City. *Sustainability*, **7**, 3109-3128. <https://doi.org/10.3390/su7033109>
- [11] Toparlar, Y., Blocken, B., Vos, P., van Heijst, G.J.F., Janssen, W.D., van Hooff, T., *et al.* (2015) CFD Simulation and Validation of Urban Microclimate: A Case Study for Bergpolder Zuid, Rotterdam. *Building and Environment*, **83**, 79-90. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.08.004>
- [12] 李学臻, 曹开法, 姜晨. 基于 CFD 的高层建筑群对临近多层建筑群城市风环境影响研究[J]. 建模与仿真, 2025, 14(7): 111-120.
- [13] Shih, T., Liou, W.W., Shabbir, A., Yang, Z. and Zhu, J. (1995) A New K-E Eddy Viscosity Model for High Reynolds Number Turbulent Flows Model Development and Validation. *Computers & Fluids*, **24**, 227-238. [https://doi.org/10.1016/0045-7930\(94\)00032-t](https://doi.org/10.1016/0045-7930(94)00032-t)
- [14] Van Doormaal, J.P. and Raithby, G.D. (1984) Enhancements of the Simple Method for Predicting Incompressible Fluid Flows. *Numerical Heat Transfer*, **7**, 147-163. <https://doi.org/10.1080/01495728408961817>
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑结构荷载规范(GB50009-2012) [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [16] Yang, Y., Gu, M., Chen, S. and Jin, X. (2009) New Inflow Boundary Conditions for Modelling the Neutral Equilibrium Atmospheric Boundary Layer in Computational Wind Engineering. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, **97**, 88-95. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2008.12.001>
- [17] Launder, B.E. and Spalding, D.B. (1974) The Numerical Computation of Turbulent Flows. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, **3**, 269-289. [https://doi.org/10.1016/0045-7825\(74\)90029-2](https://doi.org/10.1016/0045-7825(74)90029-2)
- [18] 方平治, 顾明, 谈建国, 等. 数值模拟大气边界层中解决壁面函数问题方法研究[J]. 振动与冲击, 2015, 34(2): 85-90.